

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 198 11 025 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**G 05 D 19/00**  
B 06 B 1/02

AF

②① Aktenzeichen: 198 11 025.1  
②② Anmeldetag: 13. 3. 98  
④③ Offenlegungstag: 16. 9. 99

⑦① Anmelder:  
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte  
Forschung e.V., 70174 Stuttgart, DE

⑦④ Vertreter:  
Schoppe & Zimmermann, 81479 München

⑦② Erfinder:  
Geiger, Wolfram, Dipl.-Phys., 78078 Niedereschach,  
DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:  
DE 1 95 26 903 A1  
DE 41 31 936 A1  
DE 2 96 17 410 U1

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Mechanischer Oszillator und Verfahren zum Erzeugen einer mechanischen Schwingung

⑤⑦ Ein mechanischer Oszillator mit einem Schwingkörper, der anregbar ist, um eine erzwungene Schwingung auszuführen, weist zur einfachen Amplitudenstabilisierung eine Einrichtung zum Begrenzen der Schwingungsamplitude des Schwingkörpers auf einen Wert auf, der kleiner als eine auf eine Anregungsamplitude bezogene maximale Schwingungsamplitude des Schwingkörpers ist, die erreichbar wäre, wenn die Frequenz der erzwungenen Schwingung der Resonanzfrequenz des Oszillators entspricht und die Einrichtung des Oszillators zum Begrenzen nicht vorhanden ist. In einer ersten Betriebsart wird lediglich ein kleiner Teil der im Oszillator gespeicherten Gesamtenergie bei jedem Anschlag dem Oszillator entzogen. In einer zweiten Betriebsart wird die gesamte kinetische Energie des Schwingkörpers durch den Anschlag entfernt, während in einer dritten Betriebsart der Anschlag elastisch ausgeführt ist, was zu einer Impulsumkehr des Schwingkörpers führt.

DE 198 11 025 A 1

DE 198 11 025 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf mechanische Oszillatoren und insbesondere auf mechanische Oszillatoren, die eine erzwungene Schwingung ausführen.

Mechanische Oszillatoren sind in vielen Anwendungsbereichen von besonderem allgemeinen Interesse, z. B. als Komponenten von mechanischen und mikromechanischen Drehratensensoren. Allgemeine Schwerpunkte bei der Entwicklung von Oszillatoren liegen in dem Erreichen von möglichst linearen mechanischen Eigenschaften und häufig auch in einer sehr hohen Güte der Oszillatoren. Damit sind bei gegebenen Antriebs- bzw. Erregungskräften theoretisch die maximalen Schwingungsamplituden des Oszillators erzielbar, wobei die Anregung hierbei mit der Resonanzfrequenz des Oszillators zu erfolgen hat. Um jedoch den Oszillator dauernd auf seiner Resonanzstelle zu betreiben und dabei eine feste Schwingungsamplitude einzustellen, ist meist eine sehr aufwendige Regelung erforderlich, auf die sich ebenfalls beträchtliche Entwicklungsanstrengungen richten. Insbesondere die Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz, die Druckabhängigkeit der Resonanzgüte sowie andere Umwelteinflüsse, wie z. B. Vibrationen und Schockbelastungen, schränken auch mit aufwendiger Regelelektronik den Einsatzbereich solcher Oszillatoren ein.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, einen mechanischen Oszillator bzw. ein Verfahren zum Erzeugen einer mechanischen Schwingung eines Schwingkörpers zu schaffen, um eine stabile Schwingungsamplitude zu erreichen, ohne daß eine aufwendige Regelung für die Schwingungsfrequenz oder die Schwingungsamplitude benötigt wird.

Diese Aufgabe wird durch einen mechanischen Oszillator gemäß Anspruch 1 sowie durch ein Verfahren zum Erzeugen einer mechanischen Schwingung eines Schwingkörpers gemäß Anspruch 7 gelöst.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß auf elektronische Amplitudenregelungen verzichtet werden kann, wenn ein Schwingkörper eines Oszillators in seiner Schwingungsamplitude auf einen Wert begrenzt wird, der kleiner als eine auf eine Anregungsamplitude bezogene maximale Schwingungsamplitude des Schwingkörpers ist, die erreichbar wäre, wenn die Frequenz der erzwungenen Schwingung der Resonanzfrequenz des Oszillators entspricht und keine Amplitudenbegrenzung stattfindet.

Vorzugsweise wird die Begrenzung der Schwingungsamplitude des Schwingkörpers durch einen mechanischen Anschlag realisiert, der im Auslenkungsweg des Schwingkörpers angeordnet ist. Damit wird auf mechanische Art und Weise eine maximale Amplitude des Schwingkörpers festgelegt, die der Schwingkörper nicht überschreiten kann, da er auf den Anschlag auftrifft. Somit führt eine Resonanzfrequenzverschiebung aufgrund beispielsweise der Temperatur oder anderer Ursachen nicht mehr automatisch zu einer Amplitudenänderung der Schwingung, wie sie durch die Resonanzkurve an sich vorgegeben ist, solange bezüglich der Resonanzkurve die begrenzte Schwingungsamplitude kleiner oder gleich der Schwingungsamplitude des Oszillators ohne Begrenzung ist. Damit ist auf einfache Art und Weise lediglich durch Vorsehen einer Begrenzungseinrichtung jedwede Form der Amplituden- bzw. Frequenzregelung hinfällig, da die Schwingungsamplitude durch die Begrenzungseinrichtung festgelegt wird, während die Schwingfrequenz bei Systemen, die eine erzwungene Schwingung ausführen, der Anregungsfrequenz entspricht.

Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend bezugnehmend auf die beilie-

genden Zeichnungen detaillierter erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1a** eine Draufsicht auf einen erfindungsgemäßen mechanischen Oszillator, der Teil eines mechanischen Drehratensensors in Form eines Vibrationsgyroskops ist;

**Fig. 1b** einen Schnitt entlang der Linie A-A' des Vibrationsgyroskops von **Fig. 1a**;

**Fig. 2** ein Resonanzdiagramm eines Oszillators gemäß der vorliegenden Erfindung mit konstanter Kraftkonstante mit und ohne Anschlag;

**Fig. 3** ein Resonanzdiagramm eines Oszillators gemäß der vorliegenden Erfindung mit nichtlinearer Kraftkonstante ohne Anschlag;

**Fig. 4** ein Resonanzdiagramm eines Oszillators gemäß der vorliegenden Erfindung mit nichtlinearer Kraftkonstante und geringer Güte mit eingezeichnetem Anschlag;

**Fig. 5** ein Resonanzdiagramm eines Oszillators gemäß der vorliegenden Erfindung mit nichtlinearer Kraftkonstante und hoher Güte mit eingezeichnetem Anschlag; und

**Fig. 6** eine Draufsicht auf einen weiteren erfindungsgemäßen Oszillator mit kapazitivem Anschlag.

In **Fig. 1a** ist eine Draufsicht auf einen Drehratensensor **100** gezeigt, der einen Oszillator gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung aufweist. **Fig. 1b** zeigt einen schematischen Querschnitt des Drehratensensors **100** entlang einer Linie A-A' von **Fig. 1a**. Der Drehratensensor **100** weist einen Grundkörper **102** auf, an dem mittels einer Primärschwingeraufhängung **104**, die eine Verankerung **104a** sowie vier Federbalken **104b** aufweist, ein Primärschwinger **106** befestigt ist. Der Primärschwinger **106** weist einen äußeren Ring **106a** und einen inneren Ring **106b** auf. Zwischen dem äußeren Ring **106a** und dem inneren Ring **106b** des Primärschwingers **106** sind Gruppen von kammartigen Elektroden **108** angeordnet. Die Elektrodengruppen **108** des Primärschwingers greifen jeweils fingerartig in gegenüberliegende feststehende Elektrodengruppen **110** ein. Eine Elektrodengruppe **108** des Primärschwingers bildet mit einer gegenüber angeordneten feststehenden Elektrodengruppe **110** einen sogenannten Comb-Drive oder Kammantrieb, dessen Funktionsweise bekannt ist. Die feststehenden Elektrodengruppen **110** können beispielsweise mit dem Grundkörper **102** verbunden oder auf andere Weise dem Primärschwinger gegenüber fest angeordnet sein, was in **Fig. 1b** aus Übersichtlichkeitsgründen nicht dargestellt ist. Der Primärschwinger **106** ist über Torsionsfedern **112** mit einem Sekundärschwinger **114** verbunden. Die Torsionsfeder **112** stellt somit die Sekundärschwingeraufhängung dar, mittels der der Sekundärschwinger **114** mit dem Primärschwinger **106** mechanisch gekoppelt ist.

Wie es aus **Fig. 1a** deutlich wird, weist der Sekundärschwinger **114** eine Ausnehmung auf, in der der Primärschwinger **106** angeordnet ist. Mittels Erfassungselektroden (nicht gezeigt) sowohl auf dem Substrat als auch auf der Unterseite des Sekundärschwingers **114** kann eine Auslenkung des Sekundärschwingers in z-Richtung, d. h. in die Zeichenebene hinein bzw. aus der Zeichenebene heraus, gemessen werden.

Zur Erläuterung der Funktionsweise des Drehratensensors **100**, der einen Oszillator gemäß der vorliegenden Erfindung umfaßt, wird nun auf das links in **Fig. 1a** dargestellte kartesische Koordinatensystem mit den zueinander orthogonalen Achsen x, y und z Bezug genommen.

Wenn der Drehratensensor **100** verwendet wird, um eine Drehung desselben um die x-Achse mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_x$  zu erfassen, so muß der Primärschwinger **106** zu einer Drehschwingung angeregt werden. Dies geschieht auf für Fachleute bekannte Art und Weise durch Anlegen geeigneter Wechselspannungen an jeweils gegenüberliegende Comb-Drives, welche aus den jeweils ineinander-

greifenden Elektrodengruppen 108 des Primärschwingers 106 sowie aus den denselben jeweils gegenüberliegenden feststehenden Elektrodengruppen 110 gebildet werden. Ein Comb-Drive nützt das für Fachleute bekannte kapazitive Antriebsprinzip aus. Zum Erregen des Primärschwingers 106 zu einer Drehschwingung in der x-y-Ebene können beispielsweise vier Comb-Drives verwendet werden, während die anderen vier Comb-Drives zur kapazitiven Erfassung eben dieser Drehschwingung in der x-y-Ebene verwendet werden. Bei einer Drehung des Primärschwingers 106 um die z-Achse werden die vier Federbalken 104b jeweils durch ein Drehmoment um die z-Achse abgebogen. Wie es aus Fig. 1b ersichtlich ist, weisen die vier Federbalken 106b einen rechteckigen Querschnitt auf, wobei die lange Seite des Querschnitts entlang der z-Richtung verläuft, während die kurze Seite derselben in der x-y-Ebene angeordnet ist.

Die Schwingung des Primärschwingers 106 in der x-y-Ebene wird somit über die Torsionsfedern 112 auf den Sekundärschwinger übertragen, wodurch derselbe ebenfalls eine Drehung in der x-y-Ebene vollführt, wie es durch einen links in Fig. 1a gezeichneten Pfeil 120 schematisch gezeigt ist. Dadurch ergeben sich die in Fig. 1a als Phantomlinien 121 eingezeichneten Positionen des Drehratensensors 100 bzw. des Sekundärschwingers 114.

Die auf den Sekundärschwinger wirkende Coriolis-Kraft aufgrund der Drehung des Drehratensensors 100 um eine zur x-Achse parallele Achse führt also zu einer Drehschwingung des Sekundärschwingers 114 um die y-Achse bzw. um eine bezüglich der y-Achse schräg gestellte Achse, wenn der Primärschwinger und der Sekundärschwinger gerade ausgelenkt ist, wie es durch die Phantomlinien 121 angedeutet ist.

An dieser Stelle sei angemerkt, daß es sich bei dem Drehratensensor 100 zunächst um einen Oszillator handelt, wobei der Schwingungskörper des Oszillators allgemein gesagt durch den Primärschwinger 106 und den Sekundärschwinger 114 gebildet ist. Die Unterscheidung bzw. Aufteilung des Schwingkörpers in Primär- und Sekundärschwinger findet lediglich dann Anwendung, wenn auf den Drehratensensor 100 eine Coriolis-Kraft wirkt, und der Sekundärschwinger 114 zusätzlich zu der Anregungsschwingung eine dazu orthogonale Schwingung ausführt, mittels der eine Wechselgeschwindigkeit gemessen werden kann, der der Drehratensensor 100 unterworfen ist.

Der mechanische Oszillator gemäß der vorliegenden Erfindung umfaßt ferner neben dem Schwingkörper eine Einrichtung 125 zum Begrenzen der Schwingungsamplitude des Schwingkörpers. Diese Einrichtung 125 zum Begrenzen der Schwingungsamplitude des Schwingkörpers wird nachfolgend auch als Anschlag bezeichnet. Wie es aus den Phantomlinien 121 ersichtlich ist, vollführt der Schwingkörper (106, 114) eine Drehschwingung um eine zur z-Achse parallele Mittelachse des Primärschwingers, wobei die Amplitude bzw. Auslenkung dieser Drehschwingung durch die beiden Anschläge 125 begrenzt wird.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß trotz der Tatsache, daß ein Drehratensensor mit einem Schwingkörper, der eine Drehschwingung ausführt, gezeigt ist, die vorliegende Erfindung auch jeden anderen mechanischen Oszillator umfaßt, wenn im Auslenkungsweg eines Schwingkörpers desselben ein Anschlag angebracht ist, der die Auslenkung des Schwingkörpers begrenzt. Der mechanische Oszillator gemäß der vorliegenden Erfindung umfaßt somit auch Oszillatoren mit linearer, rotatorischer oder einer Formschwingung.

Weiterhin sei darauf hingewiesen, daß die Einrichtung 125 zum Begrenzen der Schwingungsamplitude des Schwingkörpers auf einen Wert, der kleiner als eine auf eine Anregungsamplitude bezogene maximale Schwingungsam-

plitude des Schwingkörpers ist, die erreichbar wäre, wenn die Frequenz der erzwungenen Schwingung der Resonanzfrequenz des Oszillators entspricht und die Einrichtung 125 zum Begrenzen nicht vorhanden ist, nicht nur als mechanischer Anschlag ausgeführt sein kann, sondern ebenfalls als elektromagnetischer Anschlag beispielsweise in einer zu einer Wirbelstrombremse ähnlichen Funktionsweise.

Eine weitere Realisierungsform für einen Anschlag ist in Fig. 6 dargestellt, die einen kapazitiven Anschlag zeigt. Ein Drehschwinger 150 mit einer Drehfeder 152 umfaßt als Anschlag zusätzlich zwei feste Elemente 154a, 154b, die jeweils mit einer Kondensatorplatte 156a und 156b versehen sind. Diesen Kondensatorplatten liegen jeweils Kondensatorplatten 158a und 158b gegenüber, wenn sich der Drehschwinger in einer bezüglich seiner Ruheposition 160 ausgelenkten Position befindet, die zugleich die Anschlagsposition ist. Durch die elektrostatische Kraft zwischen den jeweiligen Kondensatorplatten 156a und 158a bzw. 156b und 158b, die am größten ist, wenn sich die Platten direkt parallel gegenüberliegen, wird der Drehschwinger abgebremst, wodurch seine Amplitude begrenzt wird. Alternativ ist es möglich, über die festen Elemente 154a bzw. 154b das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten zu steuern, derart, daß immer dann, wenn der Drehschwinger in der Nähe der "Anschlags"-Position kommt, ein elektrisches Feld angelegt wird, um die Amplitude der Schwingung des Schwingers 150 zu begrenzen. Weitere Steuerungsmöglichkeiten sind ebenfalls möglich.

Es bleibt somit festzuhalten, daß die Anschlageinrichtung nicht auf einen mechanischen, Wirbelstrom- oder kapazitiven Anschlag begrenzt ist. Allgemein ausgedrückt ist als Anschlag jede Anordnung geeignet, die einen geeigneten Kraftverlauf aufweist. Dieser muß sehr stark nichtlinear sein, derart, daß die Rückstellkraft an der Stelle, an der der Oszillator stoppen soll, sehr stark ansteigt, was auch als Potentialtopffunktion bezeichnet werden kann.

Die Wirkung des Anschlags besteht also darin, einen gewissen Teil der in dem Drehratensensor 100, der den Oszillator gemäß der vorliegenden Erfindung darstellt, gespeicherten Energie aus dem Schwingungssystem zu entfernen, indem kinetische Energie des Schwingkörpers durch Einwirkung der Anschläge 125 auf den Schwingkörper 106, 114 in Wärme bzw. Verformung umgesetzt wird. Dafür ist es nicht entscheidend, ob der Schwingkörper selbst an den Stellen, an denen er mit dem Anschlag Eingriff nimmt, entsprechend konstruiert ist, um verformbar zu sein, bzw. ob die Anschläge entsprechend gestaltet sind. Wesentlich ist nur, daß die Amplitude des Schwingkörpers auf einen festen Wert bzw. auf einen begrenzten Wertebereich beschränkt wird, wenn die Anschläge bzw. der Schwingkörper nachgiebig gestaltet sind, wobei beispielsweise die Anschläge etwas nachgeben würden, wenn der Schwingkörper auf dieselben "aufschlägt". Ähnliche analoge Funktionen sind unter geeigneter Steuerung auch für nichtmechanische Anschläge implementierbar.

Alternativ können die Anschläge bzw. zumindest ein entsprechender Teil des Schwingkörpers vollständig elastisch gestaltet werden, derart, daß der Schwingkörper, wenn er auf einen Anschlag auftrifft, elastisch abprallt, was zu keinem Energieverlust führt, sondern lediglich zu einer Impuls-umkehr. In diesem Fall tritt kein Energieverlust durch Wärme bzw. Verformung in dem System auf, was es möglich macht, die Amplitude der Erregungsschwingung, die an den Comb-Drive-Antrieb angelegt wird, im Vergleich zu einem verlustbehafteten Fall zu reduzieren.

Im nachfolgenden wird auf die Funktionsweise des mechanischen Oszillators gemäß der vorliegenden Erfindung unter Bezugnahme auf Fig. 2 eingegangen. Fig. 2 zeigt ein

Diagramm, bei dem der Amplitudengang eines Oszillators über der Frequenz aufgezeichnet ist. Die Ordinate stellt eine normierte Schwingungsamplitude dar, die beispielsweise auf die Amplitude der Anregungsschwingung, d. h. der durch die an den Comb-Drives angelegten Wechselspannung bewirkten Schwingung, normiert ist, wenn sich die Anregungsfrequenz weit außerhalb des Resonanzbereichs befindet (Wert 1). Die Abszisse dagegen zeigt die normierte Frequenz des Oszillators, die wie üblich auf die Resonanzfrequenz desselben normiert ist. Fig. 2 zeigt somit die normierte Ausgangsamplitude des Oszillators, wenn am Eingang eine Erregungsschwingung mit einer bestimmten normierten Frequenz angelegt wird. Die Ausgangsamplitude, d. h. die Auslenkung des Schwingkörpers 106, 114 nimmt mit größer werdender Frequenz zu, um einen Maximalwert zu erreichen, wenn die Resonanzfrequenz des Oszillators mit der Frequenz der Erregungsschwingung übereinstimmt. Bei Anregungsschwingungen oberhalb der Resonanzfrequenz nimmt die Amplitude wieder ab, um schließlich auf Null abzusinken, wenn die Anregungsfrequenz ausreichend hoch ist. Wie üblich wird der Bereich, in dem die Ausgangsamplitude des Oszillators über der statischen Amplitude ist, als Resonanzüberhöhungsbereich bezeichnet.

Fig. 2 zeigt drei Kurven. Die Kurve 1 entspricht beispielsweise dem Amplitudengang des Oszillators bei einer Nenntenperatur, während die Kurven 2 und 3 den Amplitudenverlauf des Oszillators über der Frequenz bei einer maximalen bzw. minimalen Betriebstemperatur darstellen. Daraus ergibt sich, wenn kein Anschlag vorhanden ist, eine maximale Schwankung der Amplitude in der Resonanzfrequenz, wie es durch die Pfeile 200 dargestellt ist. Drastischer wirkt sich die Situation jedoch auf einen festen Arbeitspunkt aus. Wird als Arbeitspunkt bei Nenntenperatur die Resonanzfrequenz gewählt, so erhält die Ausgangsamplitude einen Wert von 10. Verschiebt sich nun jedoch aufgrund beispielsweise einer Temperaturänderung die Amplitudenverlaufskurve, so wird die Ausgangsamplitude des Oszillators beispielsweise nur noch einen normierten Wert von 7 anstatt von 10 bei Nenntenperatur haben. Wie es bekannt ist, wird die Frequenz der Ausgangsschwingung eines Oszillators, der zu erzwungenen Schwingungen angeregt ist, durch die Anregungsschwingung bestimmt. Damit nimmt bei sich ändernder Temperatur die Ausgangsamplitude ab, da die Anregungsschwingung nicht mehr genau die gleiche Frequenz wie der Oszillator besitzt. Daher waren im Stand der Technik aufwendige Amplitudenregelungen auf elektronischer Basis erforderlich. Gemäß der vorliegenden Erfindung wird nun eine Schwingungsamplitude durch beispielsweise einen mechanischen Anschlag 125 auf einen geringeren Wert begrenzt, wobei jedoch sichergestellt ist, daß die Ausgangsamplitude des Systems über dem gesamten Temperaturbereich des Oszillators konstant ist. Es wird somit einerseits die Ausgangsamplitude des Oszillators gegenüber einem System ohne Anschlag verringert, während andererseits auf äußerst einfache Art und Weise sichergestellt wird, daß die Amplitude über dem gesamten Betriebsbereich, der in Fig. 2 als dicke Linie eingezeichnet ist, konstant bleibt.

Im nachfolgenden wird auf verschiedene Betriebsarten eingestellt, die sich im wesentlichen darin unterscheiden, wieviel kinetische Energie des Schwingungskörpers beim Aufeinandertreffen von Schwingungskörper und Anschlag umgesetzt wird.

Die bevorzugte Betriebsart des Oszillators besteht darin, daß der Schwingkörper im Verlauf jeder Schwingungsperiode den Anschlag normalerweise ein- oder zweimal nur leicht berührt, was auch als "Betriebsart des weichen Anschlags" bezeichnet wird. Dies bedeutet jedoch nicht eine geringe Federsteifigkeit des Anschlags. Statt dessen kann

bei dieser Betriebsart der Anschlag so starr als möglich ausgeführt sein. Derselbe könnte jedoch auch elastischer gebildet sein, da der Schwingkörper lediglich mit geringer kinetischer Energie auf denselben auftrifft. In der Betriebsart des weichen Anschlags findet somit im Verhältnis zur Gesamtenergie des Oszillators nur ein geringer Energieverlust am Anschlag statt. Der Energieverlust am Anschlag durch Umsatz von kinetischer Energie in Verformung bzw. Wärme liegt üblicher unter 50%. Bevorzugterweise ist jedoch der Anschlag abhängig von der zu erwartenden Variation der Eigenresonanzfrequenz des Oszillators so weich als möglich zu wählen, weshalb es bevorzugt wird, lediglich weniger als 10% der Gesamtenergie pro Anschlag aus dem Schwingungssystem zu entziehen. Damit ist es für einen weiten Bereich der Amplitude und der Frequenz der Antriebs- oder Erregungskraft eine im wesentlichen ungestörte harmonische Schwingung mit fester Amplitude erzielbar, d. h. auf eine Regelung der Antriebskraft kann vollständig verzichtet werden. Temperaturbedingte Änderungen der Resonanzfrequenz, druckabhängige Änderungen der Güte und andere Umwelteinflüsse haben über einen weiten Bereich keinen Einfluß mehr auf die Schwingungsamplitude des Oszillators.

Wie es in Fig. 2 gezeigt ist, beträgt die Güte des mechanischen Resonators, der Fig. 2 zugrunde liegt, lediglich 10. In der Praxis treten jedoch Güten bis zu über 100 000 auf. Wie es bekannt ist, ist bei Oszillatoren hoher Güte der Resonanzüberhöhungsbereich enger, da die Güte eben durch die Breite des Resonanzüberhöhungsbereichs definiert ist, d. h. durch das Verhältnis der Resonanzfrequenz zur 3 dB Bandbreite, d. h. dem Frequenzbereich, bei dem die Amplitude auf das 1/2fache der Amplitude in der Resonanzfrequenz abgefallen ist.

Ein Oszillator mit Anschlag kann somit bei einem festen Arbeitspunkt betrieben werden. Dieser hat, wenn auf Fig. 2 Bezug genommen wird, die feste normierte Kreisfrequenz, die durch die Anregungsschwingung eingestellt wird, und eine feste Kraftamplitude, die zur Erzielung der Resonanzstelle der Kurve 1 erforderlich wäre. Unter diesen Bedingungen wird im Rahmen der dargestellten Schwankungen stets dieselbe Amplitude, die durch den Anschlag vorgegeben ist, erzielt. In dem dargestellten Beispiel ist die Amplitude gegenüber dem Oszillator ohne Anschlag zwar um 30% kleiner, durch den Anschlag kann aber auf jede Regelung der Antriebskraft verzichtet werden, wie es bereits erwähnt wurde.

Der Arbeitsbereich des Oszillators wird als der Frequenzbereich definiert, in welchem der Oszillator bei konstanter Amplitude der Antriebskraft und bei konstanter Temperatur mit fester Amplitude betrieben werden kann. Der Arbeitsbereich verschiebt sich bei veränderten Umweltbedingungen und wird im allgemeinen bei größeren Antriebskräften breiter. Das Verschieben des Arbeitsbereichs ist analog zum Verschieben der Resonanzstelle bei einem Oszillator ohne Anschlag. Bei einem Oszillator mit Anschlag bleibt die Schwingungsamplitude allerdings konstant, solange der verschobene Arbeitsbereich den Arbeitspunkt enthält.

Der Arbeitsbereich mit im wesentlichen harmonischer Schwingung ist eng mit der durch den Anschlag vorgegebenen Auslenkung verknüpft. Wie aus Fig. 2 deutlich ist, führt eine Erweiterung des Arbeitsbereichs zu einer Reduzierung der Schwingungsamplitude. Anders ausgedrückt, wird zu einer Erweiterung des Arbeitsbereichs der Anschlag auf eine niedrigere Amplitude gesetzt. Der Erweiterung des Arbeitsbereichs sind außerdem weitere Grenzen gesetzt. Bei bestimmten Grenzwerten der Antriebskraft, der Eigenschaften des Oszillators, d. h. der Dämpfung und der Resonanzfrequenz, und der Dämpfung und Kraftkonstante des An-

schlags 125 wird die Oszillatorschwingung gestört, d. h. die Schwingung ist nicht mehr im wesentlichen harmonisch. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Energieverlust des Oszillators beim Anschlag im Verhältnis zur Gesamtenergie des Oszillators nicht mehr gering ist.

Steht bei einer Anwendung ausreichend Antriebskraft über die Comb-Drives zur Verfügung, so kann der Oszillator auf eine Betriebsart mit "hartem Anschlag" eingestellt werden. Vorteilhaft ist hier eine Anregungsfrequenz, die deutlich von der Resonanzfrequenz abweicht. Der Effekt der Resonanzüberhöhung wird dabei weitgehend nicht ausgenutzt, d. h. der Oszillator arbeitet im wesentlichen mit der statischen Amplitude. In der Betriebsart mit "hartem Anschlag" verliert der Oszillator beim Anschlag (annähernd) die gesamte kinetische Energie. Er wird durch die Antriebskräfte am Anschlag gehalten und führt bei Umkehr der Kraftwirkung bzw. bei Phasenumkehr der Anregungswechselspannung eine durch den zeitlichen Verlauf der Antriebskraft bestimmte Bewegung bis zum nächsten Anschlag am Anschlag aus. Anders ausgedrückt wird der Schwingkörper mit relativ hoher kinetischer Energie auf den Anschlag gefahren, wobei die kinetische Energie in Wärme und Verformung des Anschlags bzw. des Schwingkörpers umgesetzt wird. Die Anregungswechselspannung, die hier beispielsweise eine Rechteckspannung sein könnte, ist so gewählt, daß der Schwingkörper noch eine kurze Zeitspanne nach dem Anschlagen auf den Anschlag gegen den Anschlag gedrückt wird, um ein Abprallen bzw. einen Effekt ähnlich eines mehrmals aufprallenden Gummiballs zu verringern oder sogar zu unterdrücken. Ruht der Schwingkörper am Anschlag, wird die Phase der Anregungsschwingung wieder umgekehrt, was dazu führt, daß der Schwingkörper in die andere Richtung getrieben wird, um wieder auf einen Anschlag aufzuschlagen. Es sei angemerkt, daß in dieser Betriebsart die Elastizität bzw. Beschaffenheit des Anschlags und des Schwingkörpers nicht wesentlich sind, da ein eventuell unerwünschtes Abprallen durch eine entsprechende Phasensteuerung der Anregungswechselspannung erreicht wird. Ist der Anschlag aus einem eher absorbierenden Material hergestellt, so könnte die Zeit, in der der Schwingkörper nach dem Aufprall noch gegen den Anschlag gedrückt wird, verkürzt bzw. eliminiert werden.

Eine weitere Betriebsart des Oszillators besteht darin, am Anschlag eine Impulsumkehr des Schwingkörpers herbeizuführen. Der Schwingkörper prallt somit im wesentlichen ohne Energieverlust in Form eines elastischen Stoßes von dem Anschlag ab. Hier tritt also kein Energieverlust auf, es muß also weniger Energie über die Amplitude der Erregungsschwingung in den Oszillator hineingesteckt werden.

Wie es aus den beschriebenen Betriebsarten deutlich wird, muß für jede Betriebsart eine Abstimmung der Antriebskraft, d. h. der Amplitude, Frequenz und des zeitlichen Verlaufs, der Eigenschaften des Oszillators, d. h. der Dämpfung und der Resonanzfrequenz, und den Eigenschaften des Anschlags, d. h. der Dämpfung und der Kraftkonstante bzw. Steifigkeit, durchgeführt werden. Der Arbeitsbereich des Oszillators kann bei Verwendung nichtlinearer Kraftkonstanten bzw. Steifigkeiten des Oszillators erweitert werden. Dies ist vor allem im Zusammenhang mit der Betriebsart des weichen Anschlags von Interesse. Die Resonanzüberhöhung kann dann weitgehend ausgenutzt werden, und der Arbeitsbereich kann deutlich vergrößert werden, ohne allzu große Amplitudenverluste hinnehmen zu müssen.

Zunächst sei bezugnehmend auf Fig. 3 auf Eigenschaften von Oszillatoren mit nichtlinearen Kraftkonstanten eingegangen. Kurve 4 zeigt dabei den Frequenzgang eines nichtlinearen mechanischen Oszillators, bei welchem die Steifigkeit mit zunehmender Auslenkung zunimmt. Wird die in

Fig. 3 gezeigte Kurve von links nach rechts durchlaufen, so steigt die Amplitude langsamer als bei einem linearen Oszillator, der zu Vergleichszwecken durch die Kurve 1 in Fig. 3 dargestellt ist. An dem Punkt a springt die Amplitude dann auf den Punkt b herunter. Wird die Kurve dagegen von rechts nach links durchlaufen, folgt die Amplitude zwischen den Punkten b und c dem unteren Ast, und am Punkt c springt die Amplitude dann auf den Punkt d. Der Kurventeil, der die Punkte a und c direkt miteinander verbindet, stellt instabile Zustände dar.

Im Unterschied zum linearen Oszillator ist somit beim Einschalten, d. h. beim Einschwingen des Oszillators, die Vorzugsrichtung beim Durchfahren der Frequenz durch die Art der Nichtlinearität festgelegt. Nimmt die Steifigkeit mit zunehmender Auslenkung zu, wie, es in den Abb. 3, 4 und 5 dargestellt ist, beginnt man vorzugsweise bei kleineren Frequenzen und erhöht beim Einschalten die Frequenz. Nimmt die Steifigkeit dagegen mit zunehmender Auslenkung ab, beginnt man vorzugsweise bei größeren Frequenzen und verkleinert während des Einschwingens die Frequenz. Eine mit zunehmender Auslenkung abnehmende Steifigkeit tritt beispielsweise bei Systemen mit elektrostatischen Komponenten der Steifigkeit auf.

Fig. 4 zeigt nun die Kombination eines nichtlinearen Oszillators, wie er bezugnehmend auf Fig. 3 beschrieben wurde, mit einem Anschlag. Wird die Kurve hier von links nach rechts durchlaufen, so nimmt die Amplitude bis zu einem Punkt e zu. Vom Punkt e an ist die Amplitude durch den Anschlag auf einen festen Wert begrenzt. Am Punkt f springt die Kurve auf den Punkt g auf dem unteren Ast. Der Punkt f wird durch die Antriebskraft, d. h. deren Amplitude, Frequenz und zeitlicher Verlauf, die Eigenschaften des Oszillators, d. h. Dämpfung und Resonanzfrequenz, und die Eigenschaften des Anschlags, d. h. Dämpfung und Kraftkonstante bestimmt und besitzt eine Frequenz zwischen der Frequenz der Punkte e und k.

Beim Durchlaufen der Kurve von rechts nach links erfolgt erst beim Punkt h ein Sprung auf den Punkt i. Bei dem dargestellten Beispiel springt die Amplitude auf die maximale, lediglich durch den Anschlag festgelegte Amplitude.

In Abweichung vom vorliegenden Ausführungsbeispiel sei noch einmal darauf hingewiesen, daß die Kombination eines Anschlags mit einem Schwingkörper nicht auf einen in Fig. 1a gezeigten Drehschwinger begrenzt ist, sondern auf jeden anderen Schwinger angewendet werden kann. Ebenfalls könnte beispielsweise bezugnehmend auf Fig. 1a in dem Fall, in dem der Sekundärschwinger aus bestimmten Entwurfsgründen ebenfalls kreisförmig ausgebildet ist, eine Anschlageinrichtung innerhalb der quadratischen Ausnehmung, in der sich der Primärschwinger befindet, vorgesehen sein. Alternativ könnte eine weitere Möglichkeit darin bestehen, beispielsweise in einem flächigen Schwingkörper eine Ausnehmung vorzusehen, in der sich lediglich ein einziger Anschlag befindet, der durch Interaktion mit den Begrenzungen der Ausnehmung die maximale Schwingungsamplitude festlegt und somit eine stabile Ausgangsamplitude über einen bestimmten Arbeitsbereich bietet.

Weiterhin sei darauf hingewiesen, daß der Anschlag nicht auf einen mechanischen Anschlag begrenzt ist, sondern auch einen elektromagnetischen Anschlag umfassen kann, wenn beispielsweise an eine Wirbelstrombremse und dergleichen gedacht wird, bzw. an Kräfte, die auf Kondensatorplatten wirken, wenn diese aufeinander hin bzw. voneinander weg bewegt werden.

Der Vorteil des Anschlags in Verbindung mit nichtlinearen Kraftkonstanten wird insbesondere bei sehr hohen Güten deutlich. In bestimmten Fällen kann der Arbeitsbereich des Oszillators um den Faktor 1000 und mehr vergrößert

werden. Dies ist in Fig. 5 dargestellt, welche einen Oszillator mit einer Güte von 1000 beschreibt. Die Punkte l, m, n, o, p in Abb. 5 entsprechen der Reihe nach den Punkten e, f, g, h, i, k in Fig. 4. Im Gegensatz zum Punkt i in Fig. 4 liegt der Punkt o in Fig. 5 jedoch nicht auf dem Plateau des Anschlags.

Oszillatoren gemäß der vorliegenden Erfindung können mittels einer Vielzahl von bekannten Herstellungsverfahren produziert werden, beispielsweise mittels Feinmechanik, Mikromechanik, Funkenerosion, Spritzguß, Stanzen, Sägen, Schneiden, Laser-Trennverfahren, Tiefenlithographie und Galvanik oder LIGA.

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf alle Oszillatoren mit periodischer Bewegung und reduziert vorteilhafterweise den Aufwand für die Regelung der Amplitude bzw. erübrigt diese. Beispiele für Oszillatoren sind oszillierende Coriolis-Kraft-Drehratensensoren oder oszillierende Vakuumsensoren.

#### Patentansprüche

1. Mechanischer Oszillator mit folgenden Merkmalen: einem Schwingkörper (106, 114), der anregbar ist, um eine erzwungene Schwingung auszuführen; und einer Einrichtung (125) zum Begrenzen der Schwingungsamplitude des Schwingkörpers auf einen Wert, der kleiner als eine auf eine Anregungsamplitude bezogene maximale Schwingungsamplitude des Schwingkörpers ist, die erreichbar wäre, wenn die Frequenz der erzwungenen Schwingung der Resonanzfrequenz des Oszillators entspricht und die Einrichtung zum Begrenzen nicht vorhanden ist.
2. Mechanischer Oszillator nach Anspruch 1, bei dem die Einrichtung zum Begrenzen einen mechanischen Anschlag (125) aufweist, der im Auslenkungsweg des Schwingkörpers angeordnet ist.
3. Mechanischer Oszillator nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Einrichtung zum Begrenzen stark nichtlinear wirkt, derart, daß eine Rückstellkraft an der Stelle, an der die Schwingungsamplitude zu begrenzen ist, sehr stark ansteigt.
4. Mechanischer Oszillator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, der ferner folgende Merkmale aufweist:  
ein Substrat (102);  
zumindest einer mit dem Substrat verbundenen Kammelektrode (110), die in eine an dem Schwingkörper (106, 114) angebrachte Kammelektrode (108) eingreift;  
einer Verankerung (104a), die den Schwingkörper bezüglich des Substrats elastisch hält; und  
einer Wechselspannungsquelle, die mit den Kammelektroden (108, 110) elektrisch verbunden ist, zum Anregen des Schwingkörpers (106, 114) zu einer erzwungenen Schwingung.
5. Mechanischer Oszillator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Einrichtung (125) zum Begrenzen derart ausgeführt ist, daß sie eine im wesentlichen konstante Schwingungsamplitude des Schwingkörpers unabhängig von der kinetischen Energie des Schwingkörpers zu dem Zeitpunkt, zu dem der Schwingkörper in Wechselwirkung mit der Einrichtung zum Begrenzen kommt, sicherstellt.
6. Mechanischer Oszillator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, der eine nichtlineare Kraftkonstante aufweist, die entweder mit zunehmender Auslenkung des Schwingkörpers zu- oder abnimmt.
7. Verfahren zum Erzeugen einer mechanischen

Schwingung eines Schwingkörpers (106, 114) in einem Oszillator (100), mit folgenden Schritten:

Anregen des Schwingkörpers, damit derselbe eine erzwungene Schwingung ausführt;

Begrenzen der Schwingungsamplitude des Schwingkörpers auf einen Wert, der kleiner als eine auf eine Anregungsamplitude bezogene maximale Schwingungsamplitude des Schwingkörpers ist, die erreichbar wäre, wenn die Frequenz der erzwungenen Schwingung der Resonanzfrequenz des Oszillators entspricht und keine Begrenzung durchgeführt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die durch das Begrenzen der Schwingungsamplitude verlorene Energie im Verhältnis zur Gesamtenergie, die in dem Oszillator gespeichert ist, klein ist.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, bei dem das Anregen des Schwingkörpers ein sinusförmiges Anregen mit einer Frequenz in der Nähe der Resonanzfrequenz des Oszillators (100) ist.

10. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die durch das Begrenzen verlorene Energie annähernd die gesamte im Oszillator gespeicherte Energie ist.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem das Anregen des Schwingkörpers mit einer Frequenz durchgeführt wird, die im wesentlichen außerhalb des Resonanzüberhöhungsbereichs des Oszillators liegt.

12. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem durch das Begrenzen eine Impulsumkehr des Schwingkörpers bei einer durch das Begrenzen festgelegten Auslenkung herbeigeführt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, bei dem die Anregung des Schwingkörpers mittels einer Rechteck- oder Dreieckschwingung mit einer Frequenz im Resonanzüberhöhungsbereich des Oszillators durchgeführt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 13, bei dem der Oszillator eine bezüglich der Auslenkung des Schwingkörpers nichtlineare Kraftkonstante aufweist.

15. Verfahren nach Anspruch 14, bei dem die Kraftkonstante des Oszillators bei zunehmender Auslenkung fällt, und bei dem der Schritt des Anregens ferner folgende Schritte aufweist:

Anregen des Schwingkörpers mit einer Frequenz, die größer als die gewünschte Arbeitsfrequenz ist; und  
Erniedrigen der Frequenz, bis eine Arbeitsfrequenz erreicht ist.

16. Verfahren nach Anspruch 14, bei dem die Kraftkonstante des Oszillators bei zunehmender Auslenkung steigt, und bei dem der Schritt des Anregens ferner folgende Schritte aufweist:

Anregen des Schwingkörpers mit einer Frequenz, die kleiner als eine gewünschte Arbeitsfrequenz ist; und  
Erhöhen der Frequenz, bis eine gewünschte Arbeitsfrequenz erreicht ist.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

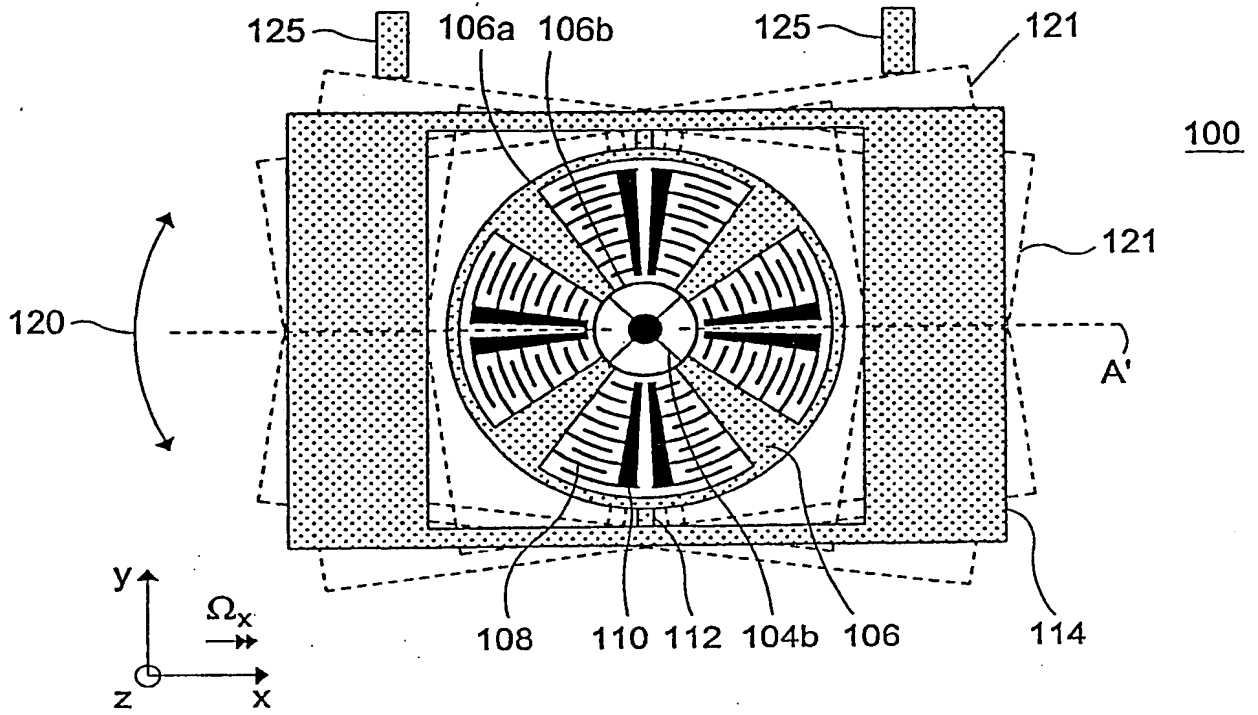


FIG. 1a

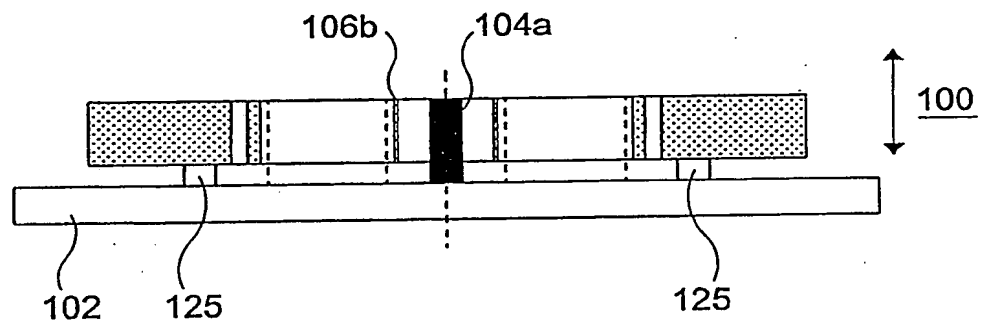
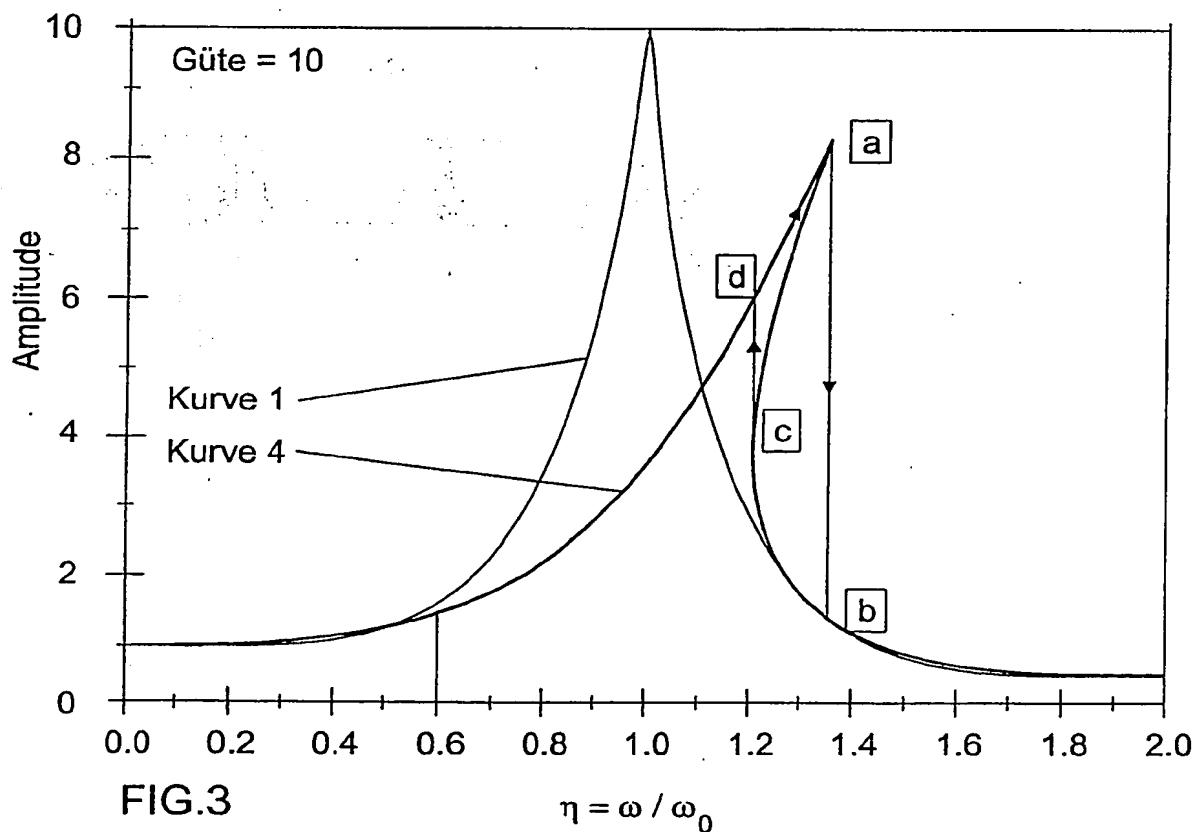
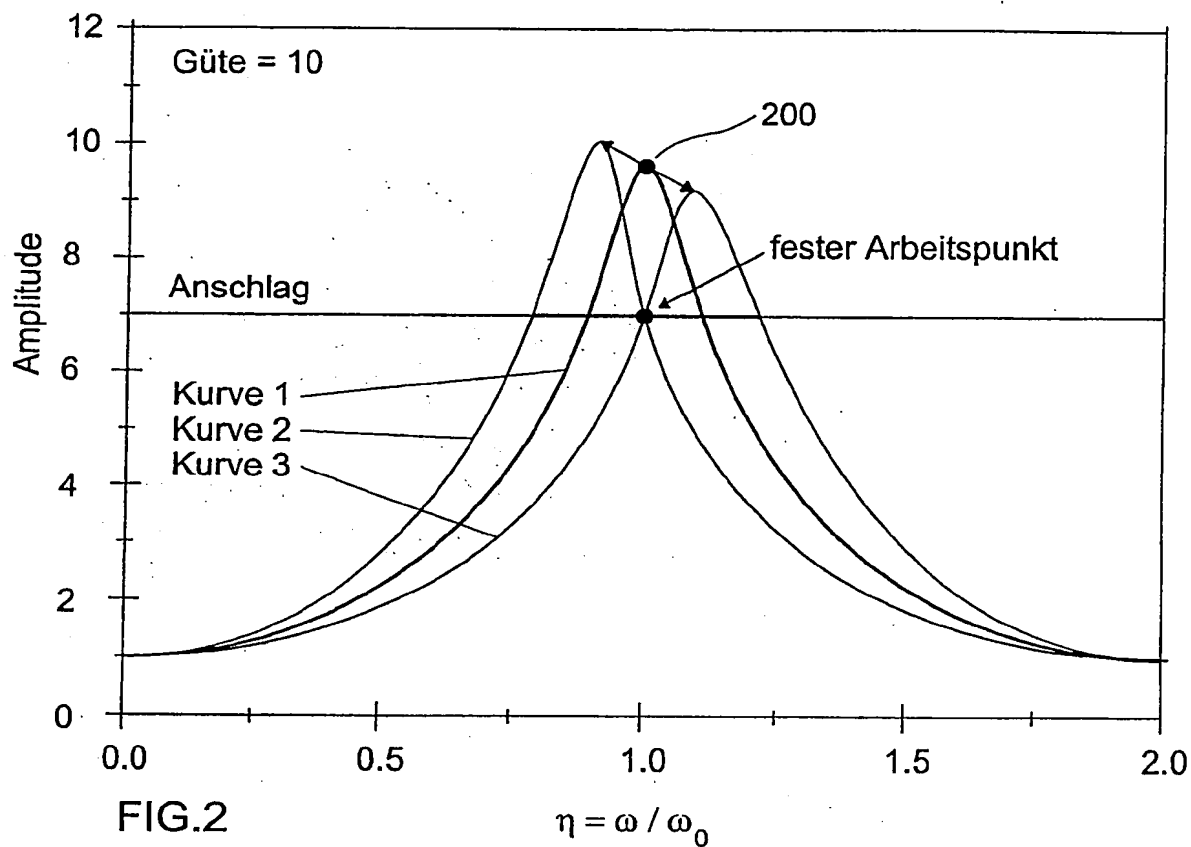
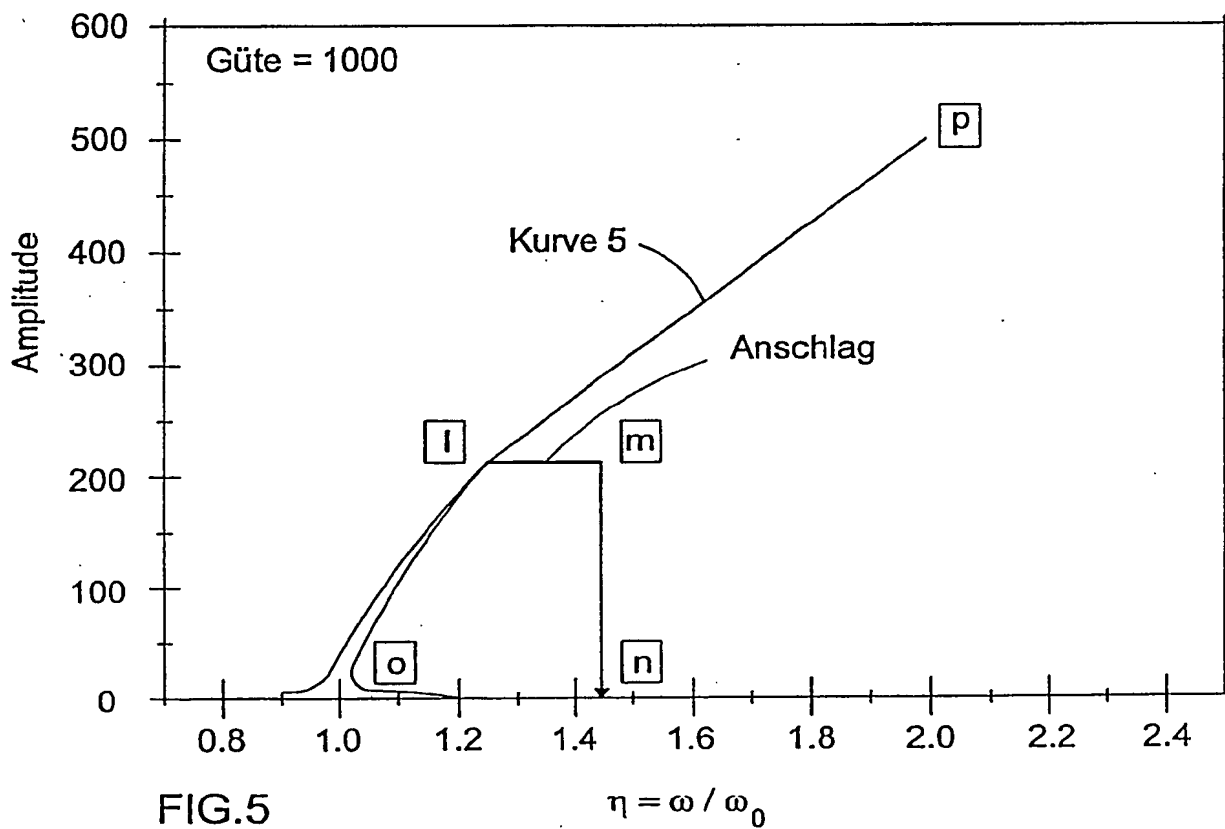
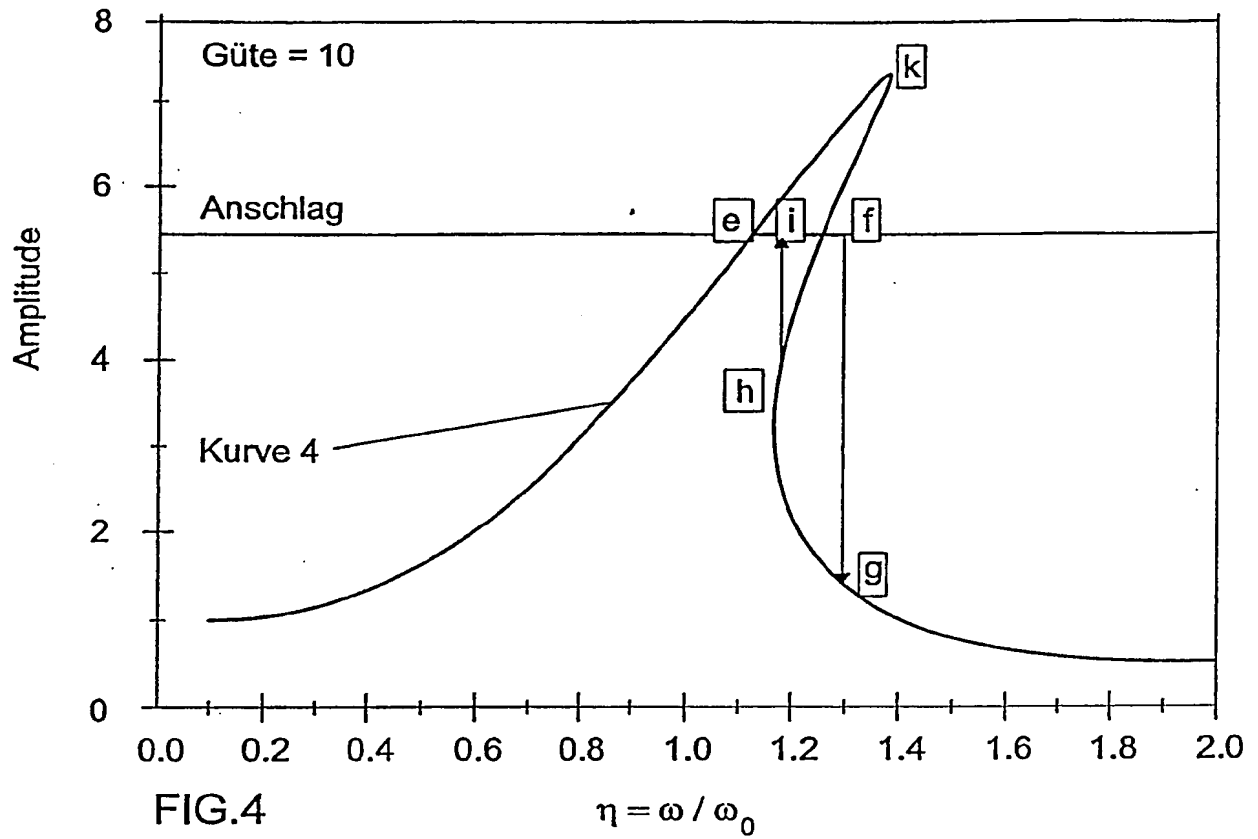
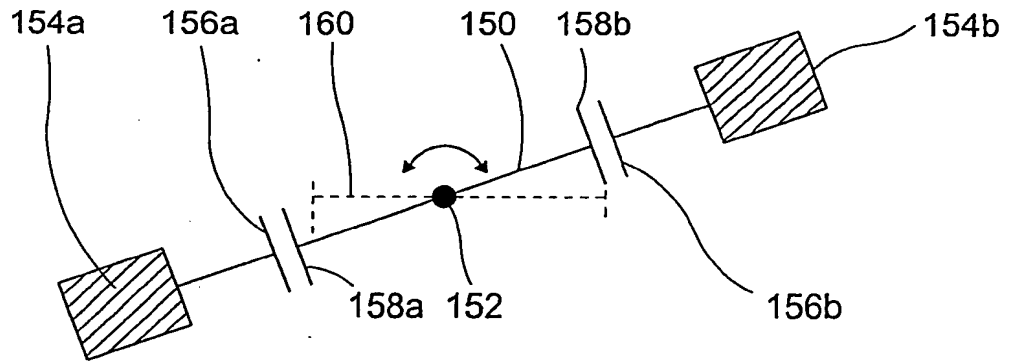


FIG. 1b









**FIG.6**